

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ЗАЗОРЕ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНОЙ ОБМОТКОЙ НА БЕГУНЕ

Описан разработанный стенд для испытания линейных электродвигателей и приведены измеренные характеристики магнитного поля в зазоре коаксиально-линейного асинхронного двигателя с фазной обмоткой на бегуне. Выполнен расчет численным методом конечных элементов по программе FEMM магнитной индукции в зазоре этого двигателя и показано хорошее согласие с результатами эксперимента.

Розроблено стенд для випробування лінійних двигунів та приведено характеристики магнітного поля в зазорі коаксиально-лінійного асинхронного двигуна з фазною обмоткою на бігуні. Проведено розрахунок чисельним методом кінцевих елементів за програмою FEMM магнітної індукції в зазорі цього двигуна та одержано задовільне узгодження з результатами експерименту.

Введение. Применение коаксиально-линейного асинхронного электродвигателя (ЛАД) для привода рабочего органа строительных машин возвратно-поступательного движения, например, толкателей, разъединителей, ударных механизмов и т.д. [1,2,3,4,8], является актуальной задачей.

В настоящее время широко используется ЛАД с короткозамкнутой обмоткой на бегуне [4]. Как известно, такого типа двигатели не позволяют увеличить пусковое тяговое усилие, а также уменьшить пусковой ток при номинальном напряжении.

Исследуемый линейный асинхронный двигатель с фазной обмоткой на бегуне изображен на рис. 1, где 1 - статор ЛАД, 2 - магнитопровод статора, 3 - обмотка статора, 4 - магнитопровод бегуна, 5 - обмотка бегуна, уложенная в паз.

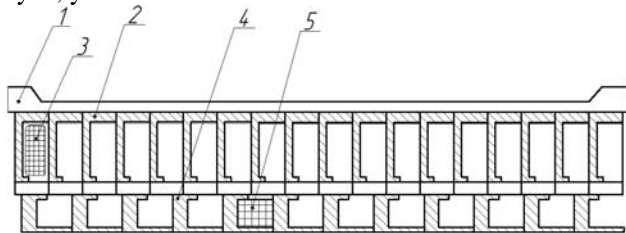


Рис. 1. Схематическое изображение ЛАД с фазной обмоткой на бегуне

Существующие в настоящее время методы и стенды для исследования недостаточно эффективны при снятии экспериментальных величин, например, магнитной индукции в зазоре, а также электромеханических характеристик двигателя [4,7,8].

Наряду с методами экспериментального исследования электромеханических характеристик и параметров электрической машины, в последнее время все более широко применяется численный метод конечных элементов [5]. Этот метод может быть использован и для расчета магнитной индукции в зазоре ЛАД с фазной обмоткой на бегуне.

Целью данной работы является анализ распределения магнитной индукции в зазоре ЛАД с фазной обмоткой на бегуне методом конечных элементов на программе FEMM, а также разработка методики экс-

периментального исследования магнитного поля в зазоре ЛАД.

Для испытания линейного асинхронного двигателя был разработан экспериментальный стенд (рис. 2). Стенд включает: 1 - линейный асинхронный двигатель, 2 - милливольтметр (МВ) ВЗ-57, персональный компьютер (ПК) и принтер (Пр), 3 - электропривод (М) подвижной рамки с индуктивным датчиком (ИД).

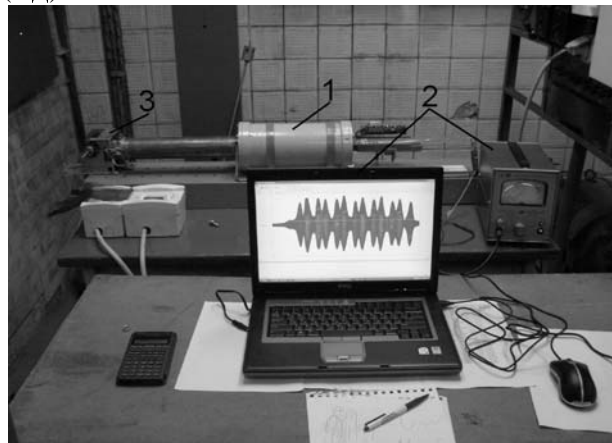


Рис. 2. Стенд для испытания линейного асинхронного электродвигателя с фазной обмоткой на бегуне

Расчетное и экспериментальное исследование ЛАД. Исследуемый линейный асинхронный двигатель имеет следующие характеристики и конструктивные параметры: номинальная мощность $P_2=1500$ Вт; подводимое напряжение $U_\phi=127$ В; частота сети $f=50$ Гц; пусковой ток $I_n=10$ А; электромагнитное тяговое усилие $F_{эм}=300$ Н; масса статора $m_1=19,2$ кг; масса бегуна $m_2=13,6$ кг; немагнитный зазор $\delta=2,5$ мм; число витков фазы статорной обмотки $W_1=80$; сечение проводника $\Delta S_{ст}=1,12$ мм²; схема соединения катушек обмотки статора соответствует схеме АЗЗВХХСУУ. Число витков фазной обмотки бегуна $W_2=200$; сечение проводника $\Delta S_{фч}=0,69$ мм²; а схема соединения фазных обмоток бегуна – звезда *abcхуз*.

Одной из основных величин, определяющих тяговое усилие ЛАД, является величина магнитной индукции B_δ в воздушном зазоре между статором и бегуном. Для расчета магнитной индукции в работе ис-

пользовался численный метод конечных элементов, реализованный в программе FEMM [5].

Задача по расчету магнитного поля в зазоре ЛАД решалась в цилиндрической системе координат в плоскости roz , для векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}}$, имеющего единственную φ – компоненту [6].

Из системы дифференциальных уравнений Максвелла для квазистационарного магнитного поля в комплексном виде

$$\begin{aligned} \text{rot} \dot{\mathbf{H}} &= \dot{\mathbf{J}}, \quad \text{rot} \dot{\mathbf{E}} = -j\omega \dot{\mathbf{B}}, \\ \text{div} \dot{\mathbf{B}} &= 0, \quad \text{div} \dot{\mathbf{J}} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнения состояния для магнитного материала, записанного в виде

$$\dot{\mathbf{B}} = \mu_{\text{eff}}(B) \dot{\mathbf{H}}, \quad \dot{\mathbf{J}} = \sigma [\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{v} \times \dot{\mathbf{B}}], \quad (2)$$

уравнение для векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}}$, $\dot{\mathbf{B}} = \text{rot} \dot{\mathbf{A}}$ при неподвижном бегуне ($\mathbf{v} = 0$) имеет вид [9]

$$\text{rot} \times \left(\frac{1}{\mu_{\text{eff}}(B)} \cdot \text{rot} \dot{\mathbf{A}} \right) = -j\omega \sigma \dot{\mathbf{A}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{стр}}. \quad (3)$$

Здесь $\dot{\mathbf{E}}$ – напряженность электрического поля, В/м; $\dot{\mathbf{H}}$ – напряженность магнитного поля, А/м; $\dot{\mathbf{B}}$ – магнитная индукция, Тл; $\dot{\mathbf{J}}_{\text{стр}}$ – плотность тока в обмотке статора и бегуна, А/мм² (определялась по измеренным значениям тока); $\mu_{\text{eff}}(B)$ – эффективная магнитная проницаемость, зависящая от B , Г/м; j – мнимая единица; ω – угловая частота, рад/с; σ – удельная электрическая проводимость массивных элементов двигателя, См/м.

На рис. 4, б показана расчетная кривая распределения магнитной индукции в зазоре между статором и бегуном исследуемого ЛАД.

Для подтверждения расчетных значений магнитной индукции было проведено экспериментальное исследование на стенде = см. рис. 2, блок-схема которого показана на рис. 3. На этой блок-схеме обозначены: линейный асинхронный двигатель 1; электропривод (М) подвижной рамки 3 с индуктивным датчиком (ИД); автотрансформатор (АТр); комплект измерительных приборов К-51; милливольтметр (МВ) В3-57; персональный компьютер (ПК) и принтер (Пр), а также автоматические выключатели $QF1$, $QF2$, $QF3$.

Включение и отключение подачи электрической энергии для питания ЛАД, привода М подвижной рамки с датчиком ИД и контролирующей аппаратуры осуществляется при помощи автоматических выключателей $QF1$, $QF2$ и $QF3$ при соответствующей технологической последовательности проведения испытания ЛАД.

Индуктивный датчик (ИД) (см. рис.3) закреплен на текстолитовой ленте подвижной рамки 3. Датчик ИД имеет $W_{\text{ид}}=10$ витков, уложенных в виде квадратной катушки размером $\Delta S_{\text{ид}}=10 \times 10 \text{ мм}^2$.

Концы индуктивного датчика ИД подключены к милливольтметру В3-57 и персональному компьютеру ПК.

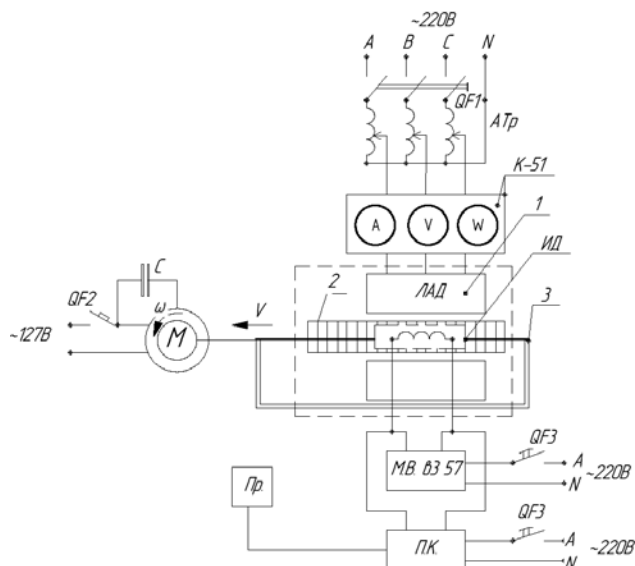


Рис. 3. Блок-схема электрическая стенда для испытания ЛАД

При измерении распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя датчик ИД непрерывно перемещался в этом зазоре с помощью привода М подвижной рамки. Исследования ЛАД проводились в режиме короткого замыкания, т.е. при заторможенном бегуне. Датчик ИД был протарирован согласно [9], а также с применением некоторых рекомендаций из [10,11] по определению магнитной индукции.

Известно [10], что действующее значение ЭДС в индуктивном датчике ИД может быть определено из выражения

$$E_{\text{ид}} = 4,44 f_1 W_{\text{ид}} \Phi_{\text{max}}, \quad (4)$$

где f_1 – частота сети, Гц; $W_{\text{ид}}$ – число витков индуктивного датчика ИД; Φ_{max} – максимальное значение магнитного потока, Вб. Отсюда, величина магнитного потока Φ_{max} будет равна

$$\Phi_{\text{max}} = \frac{E}{4,44 f_1 W_{\text{ид}}}, \quad (5)$$

а значение магнитной индукции B_{δ} равно

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\text{max}}}{\Delta S_{\text{ид}}}, \quad (6)$$

где $\Delta S_{\text{ид}}$ – площадь катушки индуктивного датчика ИД, м².

При прохождении переменного тока по обмоткам статора возникает бегущее магнитное поле, которое своими силовыми линиями пересекает обмотку индуктивного датчика ИД и наводит ЭДС $E_{\text{ид}}$.

Величина этой ЭДС фиксируется на шкале милливольтметра В3-57. Полученные значения магнитной индукции автоматически обрабатываются на персональном компьютере ПК, а их распечатка осуществляется на принтере Пр. Картина распределения магнитной индукции B_{δ} вдоль зубцовой зоны Z статора отображается на дисплее персонального компьютера.

График распределения магнитной индукции вдоль зубцовой зоны статора $B_{\delta}=f(Z)$, полученный экспериментально, приведен на рис.4б.

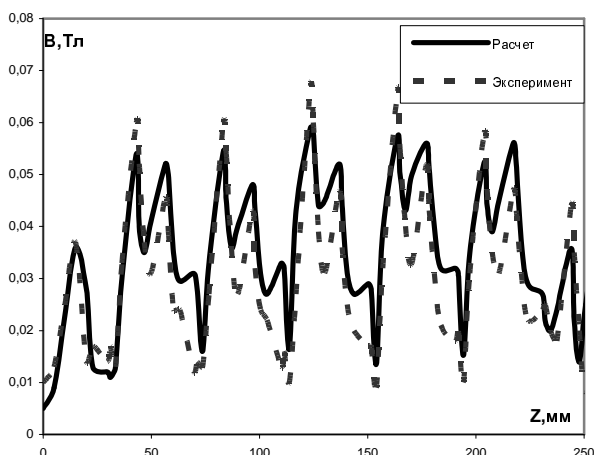


Рис.4. Графики распределения магнитной индукции вдоль зубцовой зоны статора $B_{\delta}=f(Z)$ – по результатам расчета и эксперимента

По данным рис.4) можно заключить следующее: среднеквадратичное расхождение экспериментальных и расчетных значений магнитной индукции не превышает 15%; провалы на графиках $B_{\delta}=f(Z)$ обусловлены зубцовой структурой магнитопровода статора и бегуна ЛАД; в краевых зонах активной части магнитопровода статора магнитное поле ослабевает из-за разрыва магнитной цепи. Максимальное значение индукции в воздушном зазоре B_{δ} получено в средней зоне магнитопровода статора и составляет 0,07 Тл.

Выводы. Разработана методика расчета магнитного поля в зазоре ЛАД с фазной обмоткой на бегуне с использованием численного метода конечных элементов. Результаты проведенных расчетов хорошо совпадают с экспериментальными данными - среднеквадратичное расхождение не превышает 15%.

Разработан стенд и методика испытания линейных асинхронных электродвигателей с фазной обмоткой на бегуне, позволяющие в автоматическом режиме получать распределение магнитной индукции в зазоре B_{δ} по длине статора, а также исследовать электрохимические характеристики линейного двигателя.

Полученные результаты работы по исследованию ЛАД с фазной обмоткой на бегуне могут быть использованы для усовершенствования конструкции линейного асинхронного двигателя и повышения эффективности его использования в качестве привода возвратно – поступательного движения, в частности, в строительных машинах и механизмах ударного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на корисну модель № 23757 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голенков Г.М., Попков В.С., Електродвигун зворотньо-поступального руху. Україна Оpubл. від 11.06.2007.
2. Декларацийний патент на корисну модель заявка № а 2006 13644 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голенков Г.М., Попков В.С., Електродвигун зворотньо-поступального руху. Україна Оpubл. від 22. 12. 2006.

3. А.С. №137579 (СССР). Голенков Г.М. и др. Электромагнитный молот для забивки свай. Оpubл. В БИ №7 1998.
4. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели. М. Энергоатомиздат, 1991. 256с.
5. <http://femm.foster-miller.net>
6. Голенков Г.М., Веремеєнко А.В. Оптимизация параметров линейного асинхронного двигателя с токопроводящим слоем на бегуне методом конечных элементов."Электротехника и электромеханика". Научно – практический журнал. Харків. НТУ "ХПИ" №5, 2007 с. 9–12.
7. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. Л. Энергоатомиздат, 1983. 180 с
8. Патент на корисну модель № 29884 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голенков Г.М., Попков В.С., Стенд для випробування лінійних електродвигунів. Україна. Оpubл. від 25. 01. 2008.
9. Шимони К. Теоретическая электротехника. Мир, 1964. 774 с.
10. Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П., Электродинамика; Учебное пособие для студентов физико-специализированных университетов. 2-е изд. М.; Высшая школа, 1990.– 352с.
11. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.2 – Машины переменного тока. Учебник для студентов высших техн. учеб. заведений. Изд. 3-е перераб. Л."Энергия", 1973. 648с.
12. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. Под редакцией О.Д. Гольдберга. – М. Высшая школа, 1984. 432 с.

Поступила 29.09.2009

Голенков Геннадий Михайлович, к.т.н., доцент,
Веремеєнко Андрей Владимирович
Киевский национальный университет строительства и архитектуры
Украина, 03037, Киев, пр. Воздухофлотский 31, КНУСА,
кафедра электротехники и электропривода
тел. (044) 241-55-65

Богаєнко Николай Владимирович
Попков Владимир Сергеевич
Научно-внедряющее предприятие
"Промэлектрооборудование"
Украина, 03179, Киев, ул. Ирпенская, 63а/125
тел. (044) 459-52-42

G.M. Golenkov, A.V. Veremeenko, M.V. Bogaenko, V.S. Popkov

Magnetic induction distribution in the gap of a coaxial linear induction motor with a phase winding on the runner

The paper describes a test bench developed for linear motors and presents magnetic field characteristics measures in the gap of a coaxial linear induction motor with a phase winding on the runner. Numerical FEMM-based computation of magnetic induction the motor gap is made, good correlation with experimental results shown.

Key words – test bench, coaxial linear induction motor, magnetic induction distribution, FEMM-based computation